

# Noyau atomique et radioactivité

***Défaut de masse et énergie de  
cohésion***

➤ **Unité de masse atomique: u.m.a**

L'unité de masse atomique est définie comme le douzième de la masse d'un atome de  $^{12}_6\text{C}$

$$1 \text{ u. m. a} = \frac{1}{12} \text{ (masse d'un atome de carbone 12)}$$

1 mole d'atomes de carbone 12  $\Rightarrow 12\text{g} \Rightarrow N_{\text{Avogadro}}$  atomes  
x  $\Rightarrow 1$  atome

$$1 \text{ u. m. a} = \frac{1}{12} \times \frac{12}{N_A} = \frac{1}{N_A}$$

Avec  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Enfin  **$1 \text{ u.m.a} = 1.6604 \cdot 10^{-24} \text{ g}$**

$$1.\text{u.m.a} = 1,6604 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

$$1\text{J} = 10^7 \text{ ergs}$$

$$1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1\text{MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

➤ *Défaut de masse*

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{noyau}}$$

➤ *Energie de cohésion*

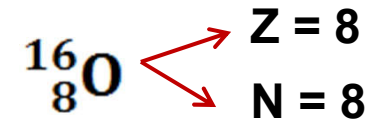
$$\Delta E = \Delta m \cdot C^2$$

Avec C : la vitesse de la lumière  
 $C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

➤ *Energie de cohésion par nucléon*

$$\Delta E' = \frac{\Delta E}{A}$$

**Exemple** : calcul de l'énergie de cohésion de l'atome :



$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{noyau}}$$

$$m_p = 1,0073 \text{ u.m.a}$$

$$m_n = 1,0087 \text{ u.m.a}$$

$$M_{\text{noyau}} = 15,9905 \text{ u.m.a}$$

$$\Delta m = 8 \times 1,0087 + 8 \times 1,0073 - 15,9905$$

$$= 0,137 \text{ u.m.a} = 0,137 \times 1,6604 \cdot 10^{-27} = 0,227 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Donc;  $\Delta E = 0,227 \cdot 10^{-27} \times (3 \cdot 10^8)^2$

$$= 2,11 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

# *Radioactivité*

## *Radioactivité*

Radioactivité: déséquilibre des forces internes du noyau entraînant l'émission de rayonnement ionisant :

- Radioactivité naturelle découverte en 1898 par Henrie Becquerel
- Radioactivité artificielle découverte en 1934 par Irène et Frédéric Joliot-Curie

## ***Radioactivité***

- La radioactivité est la propriété d'un noyau atomique instable de se transformer spontanément en noyaux d'une autre espèce chimique, avec émission de rayonnement et de particules.
- Les protons et les neutrons sont collés les uns aux autres grâce à une force de cohésion appelée « interaction nucléaire », qui est généralement suffisante pour les maintenir ensemble.

**On dit alors que le noyau est « stable ».**

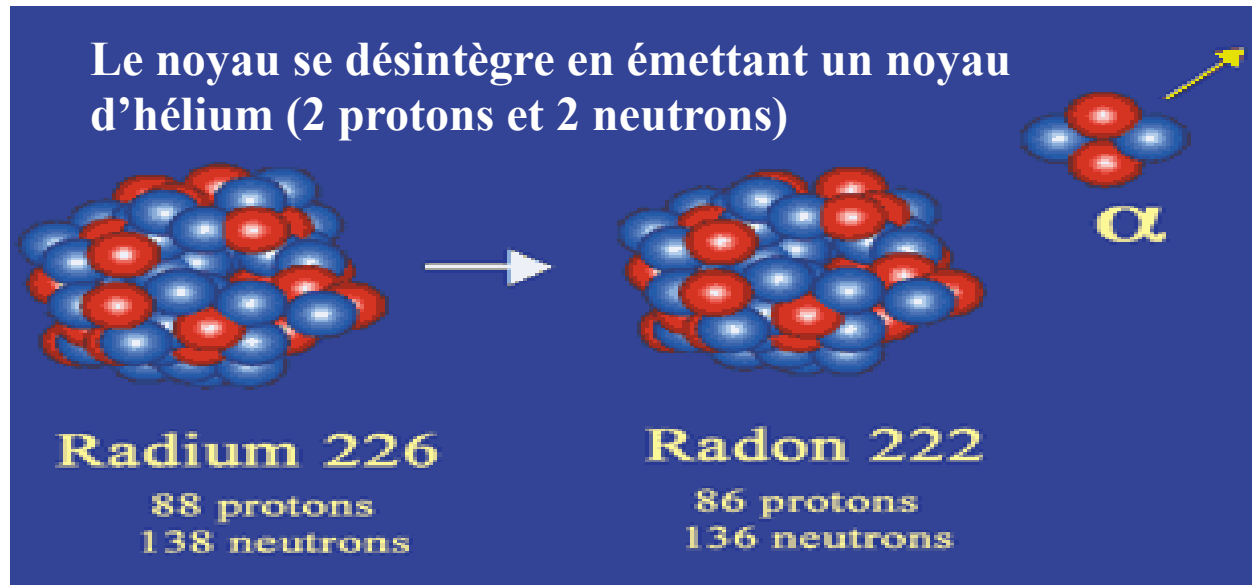
- Certains noyaux contiennent trop de particules ou renferment trop d'énergie de sorte que la force de cohésion n'est plus suffisante pour maintenir les neutrons et les protons ensemble. Ils se transforment spontanément avec émission de particules et sans intervention extérieure.

**Les noyaux sont alors « instables »**

**Les nucléides instables sont dits « radioactifs »**



► **Rayonnement  $\alpha$**  L'émission survient pour des noyaux lourds



Le noyau d'hélium est également appelé rayonnement alpha par abus de langage. Ce rayonnement n'est pas très dangereux car quelques millimètres de papier sont suffisants pour le stopper.

Cette radioactivité ne concerne que les noyaux lourds, dont le numéro atomique est en général supérieur à 74 (tungstène). Le noyau le plus lourd concerné par cette radioactivité est l'uranium 238.

## ► *Rayonnement $\beta$*

Il existe deux type de radioactivité bêta : la bêta- et la bêta+.

Lors de la bêta-, un neutron se transforme en proton en émettant un électron (que l'on appelle aussi le rayonnement bêta, par abus de langage) et un neutrino (une particule de masse très faible, voire nulle non chargée).

On a donc l'équation : 
$${}^A_Z\text{X} \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}\text{X}' + {}^0_{-1}\text{e} (\beta^-)$$
 Négatons

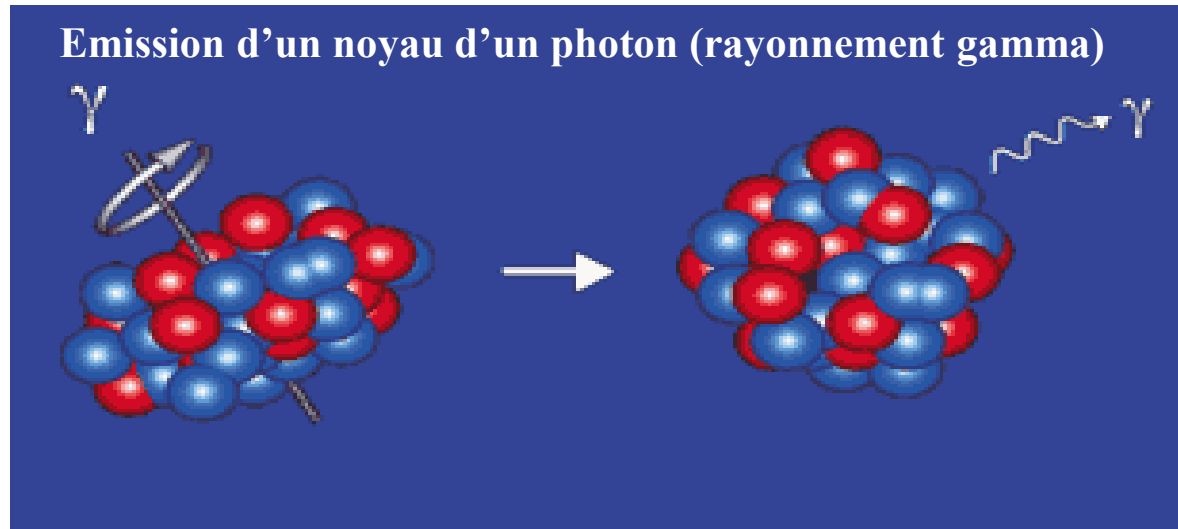
Lors de la bêta+, un proton se transforme en neutron en émettant un positon (l'anti-particule de l'électron) et un neutrino.

On a donc l'équation : 
$${}^A_Z\text{X} \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}\text{X}' + {}^0_{+1}\text{e} (\beta^+)$$
 Positons

Les électrons et positons sont émis à grande vitesse mais sont facilement absorbés (quelques millimètre d'aluminium suffisent), ils ne sont donc pas très dangereux.

## ► *Rayonnement $\gamma$*

Lors de ce type de radioactivité, il n'y a pas d'émission de particules ou de désintégrations à proprement parler.



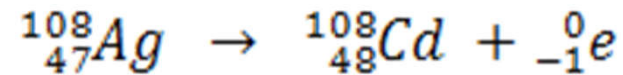
Elle intervient pratiquement après chaque transformation radioactive alpha ou bêta. Il s'agit de l'émission d'énergie (appelée cette fois à juste titre rayonnement gamma) due à la désexcitation du noyau fils. En effet, lors de la transformation radioactive, le noyau fils est excité (excitation marquée par \*), c'est-à-dire que certains de ses électrons se situent sur des couches électroniques trop éloignées du noyau. Les électrons auront alors tendance à se rapprocher du noyau et c'est ce rapprochement, ce « saut » d'une couche électronique à une autre qui provoque l'émission d'énergie.

Cette radioactivité est la plus dangereuse vu qu'elle produit beaucoup de dégâts et qu'elle est difficile à stopper (il faut en général quelques mètres de béton)

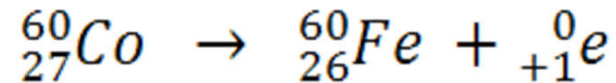
➤ *Rayonnement  $\alpha$*



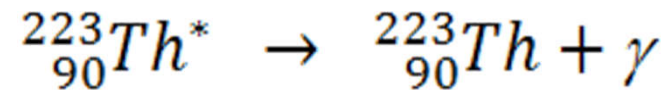
➤ *Rayonnement  $\beta^-$*



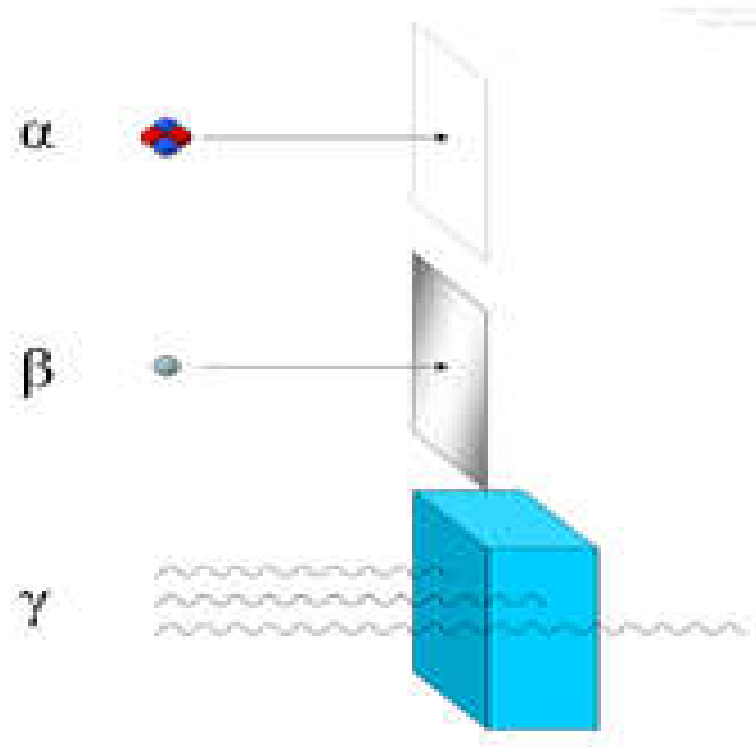
➤ *Rayonnement  $\beta^+$*



➤ *Rayonnement  $\gamma$*



# ***Le pouvoir de pénétration des rayonnements***



**Dans quelle mesure la radioactivité est-elle dangereuse pour l'Homme ?**

## *Grandeurs relatives à la dangerosité de la radioactivité*

- **L'activité**
- **La dose absorbée**
- **Les effets biologiques d'un organisme irradié**
- **Le débit de dose**

## *Grandeurs relatives à la dangerosité de la radioactivité*

- **L'activité** : C'est le nombre de désintégrations par seconde que subit un échantillon radioactif. Elle s'exprime en becquerels.
- **La dose absorbée** : C'est la quantité d'énergie déposée par un échantillon radioactif dans un organisme. Son unité est le gray, équivalent à un joule par kilogramme de matière irradiée.
- **Les effets biologiques d'un organisme irradié** qui s'expriment en sieverts.
- **Le débit de dose** Il désigne l'intensité momentanée d'une radiation en un point. C'est une grandeur importante car les effets biologiques dus aux rayonnements dépendent de la durée d'exposition pour une même dose absorbée. L'unité du débit de dose est le sievert par seconde.



**La radioactivité qui nous entoure, le rapport entre les doses radioactives reçues et les effets d'une irradiation**

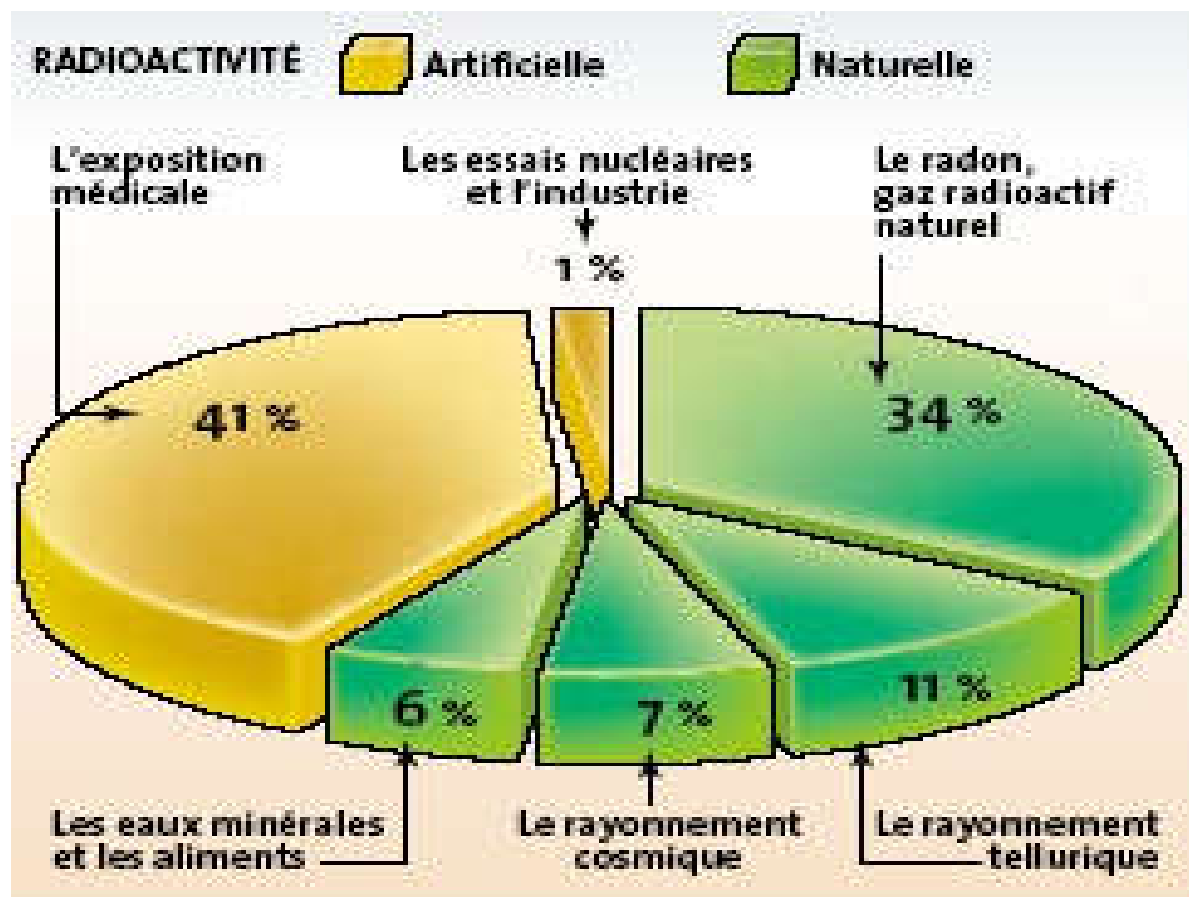
# *Effets en moyenne d'une irradiation globale sur l'Homme*

Dosimètre



Doses (Sv)	Effets d'une dose unique
Dose<0.05	Aucun
0.05<dose<0.5	Modification de la formule sanguine
0.5<dose<1	Troubles digestifs légers, épilations partielles, fatigabilité persistante (plusieurs mois), augmentation significative des cas de cancers, stérilité permanente chez la femme, stérilité pendant deux ou trois ans chez l'Homme
1<dose<2	10% de mortalité dans les mois qui suivent
2.5<dose<4	Nausées, vomissements, vertiges dès la fin de l'irradiation, modification de la formule sanguine, risques mortels élevés en cas d'infection (à cause de la chute des lymphocytes, cellules intervenant dans le système immunitaire)
4<dose<6	Troubles sanguins et digestifs graves, diarrhées et vomissements, risques de perforations intestinales
6<dose<7	90% de mortalité dans les mois consécutifs à l'irradiation
7<dose<10	Mort certaine dans les mois qui suivent
100<dose<1000	Mort dans les minutes qui suivent

## *Les doses absorbées en moyenne par un français*



Un Français reçoit en moyenne 2.4 mSv par an.

## ***Tout élément Radioactif possède une vitesse de désintégration***

- Le nombre de transformations (désintégrations) par unité de temps = **Activité**

**1 Bq (BECQUEREL) = 1 désintégration par seconde**

**1 Ci (CURIE) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  désintégrations par seconde**

- La désintégration radioactive est un phénomène probabiliste :  
si l'on considère un seul noyau, l'instant de désintégration est imprévisible.
- La **constante radioactive** (symbole  $\lambda$ ) est la probabilité de désintégration radioactive pendant le temps  $\Delta t$
- Sur un grand nombre de noyaux identiques, le nombre de désintégrations par seconde est le même.

## ***Tout élément Radioactif possède une vitesse de désintégration***

- Le nombre de transformations (désintégrations) par unité de temps = **Activité**

**1 Bq (BECQUEREL) = 1 désintégration par seconde**

**1 Ci (CURIE) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  désintégrations par seconde**

$$A_t = dN_t / dt = - \lambda N_t$$

- Les éléments ne se désintègrent pas au même temps :

→ 4,5 milliards et demi d'année pour la désintégration de la moitié l'Uranium 238

→ 3 minutes pour la désintégration du Polonium

- Un élément est susceptible de manifester une radioactivité naturelle s'il vérifie la relation suivante :

$$\frac{A - Z}{Z} \geq 1,5$$

## *Cinétique des transformations radioactives*

➤ Evolution d'une population d'atome radioactifs :

$$N_{(t)} = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A_{(t)} = A_0 e^{-\lambda t}$$

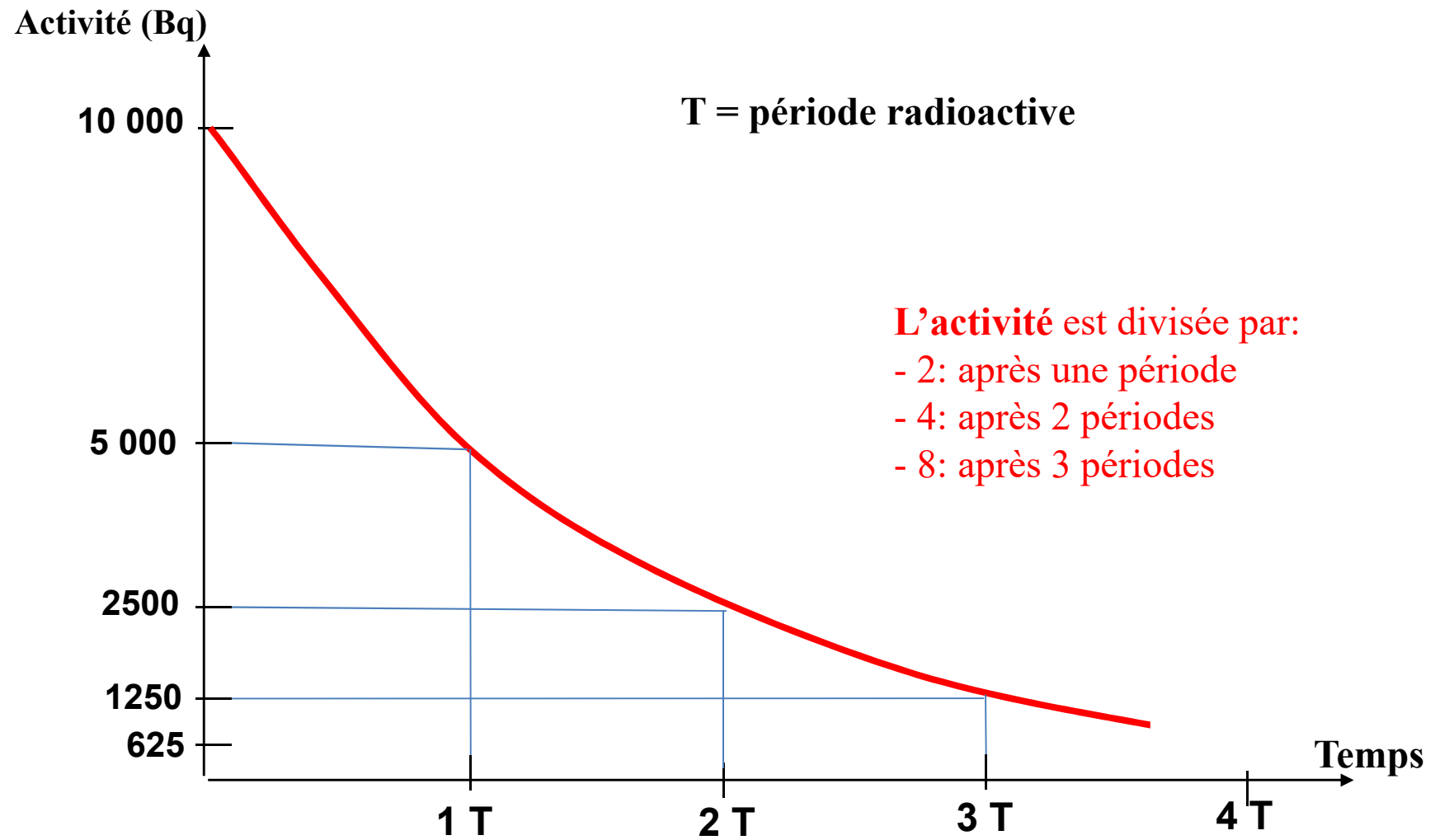
Où  $N_{(t)}$  = nb d'atome persistant (non désintégré) au bout du temps  $t$   
 $N_0$  = nombre initial d'atomes  
 $\lambda$  = constante radioactive ( $s^{-1}$ )

### Période radioactive T

temps au bout duquel 50% des atomes se sont désintégrés

$$N_{(T)} = N_0/2 \quad \Rightarrow \quad T = (\ln 2) / \lambda$$

## *La décroissance radioactive*



### Exercice d'application 1 :

Une certaine substance radioactive dont la demi-vie est de 10 s émet  $2 \cdot 10^7$  particules alpha par seconde.

1- Calculer la constante de désintégration de cet isotope.

2- Calculer l'activité de cette substance Bq .

3- Combien y a-t-il de noyaux radioactifs dans cette substance ?

4- Combien en restera-t-il après 30 secondes ?



### Exercice d'application 1 :

Une certaine substance radioactive dont la demi-vie est de 10 s émet  $2 \cdot 10^7$  particules alpha par seconde.

1- Calculer la constante de désintégration de cet isotope.

$$0,693 / 10 = 0,0693 \text{ s}^{-1}.$$

2- Calculer l'activité de cette substance Bq .

$$2 \cdot 10^7 \text{ Bq}$$

3- Combien y a-t-il de noyaux radioactifs dans cette substance ?

$$A = \lambda N_0 \text{ donne } N_0 = 2 \cdot 10^7 / 0,069 = 2,9 \cdot 10^8 \text{ noyaux à } t=0 .$$

4- Combien en restera-t-il après 30 secondes ?

**30 seconde c'est trois périodes**

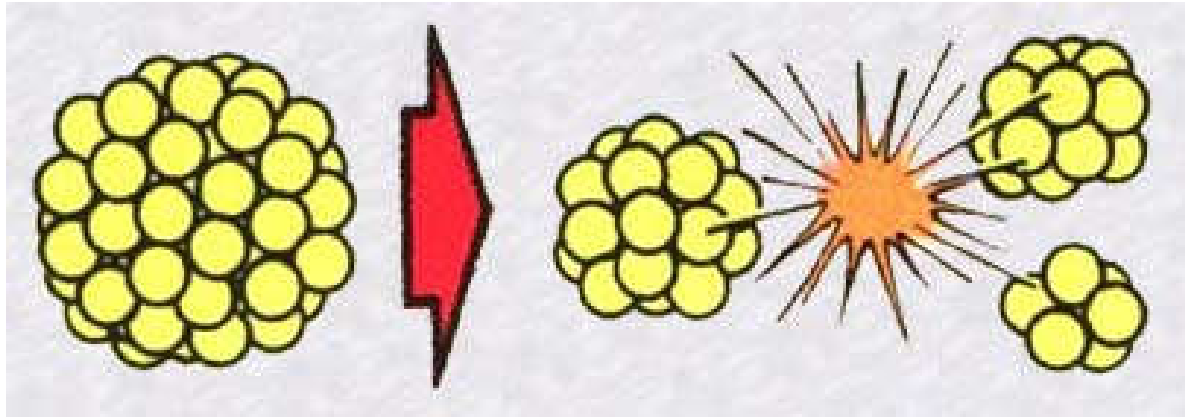
**au bout d'une période : il reste  $\frac{1}{2}$   $2,9 \cdot 10^8$  noyaux ( la moitié a disparu)**

**au bout de 2 périodes,  $2,9 \cdot 10^8 / 4$  noyaux.**

**pour 3 périodes ,  $2,9 \cdot 10^8 / 8 = 3,6 \cdot 10^7$  noyaux.**

# ***Fission et fusion***

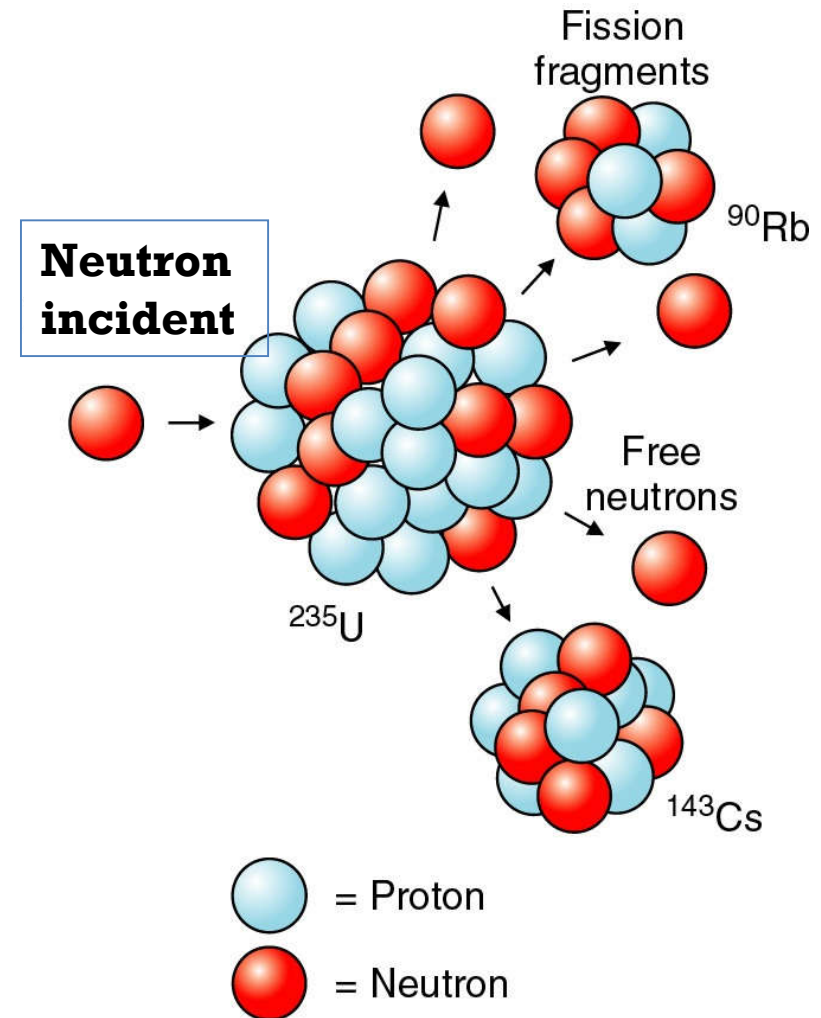
## *Fission nucléaire*



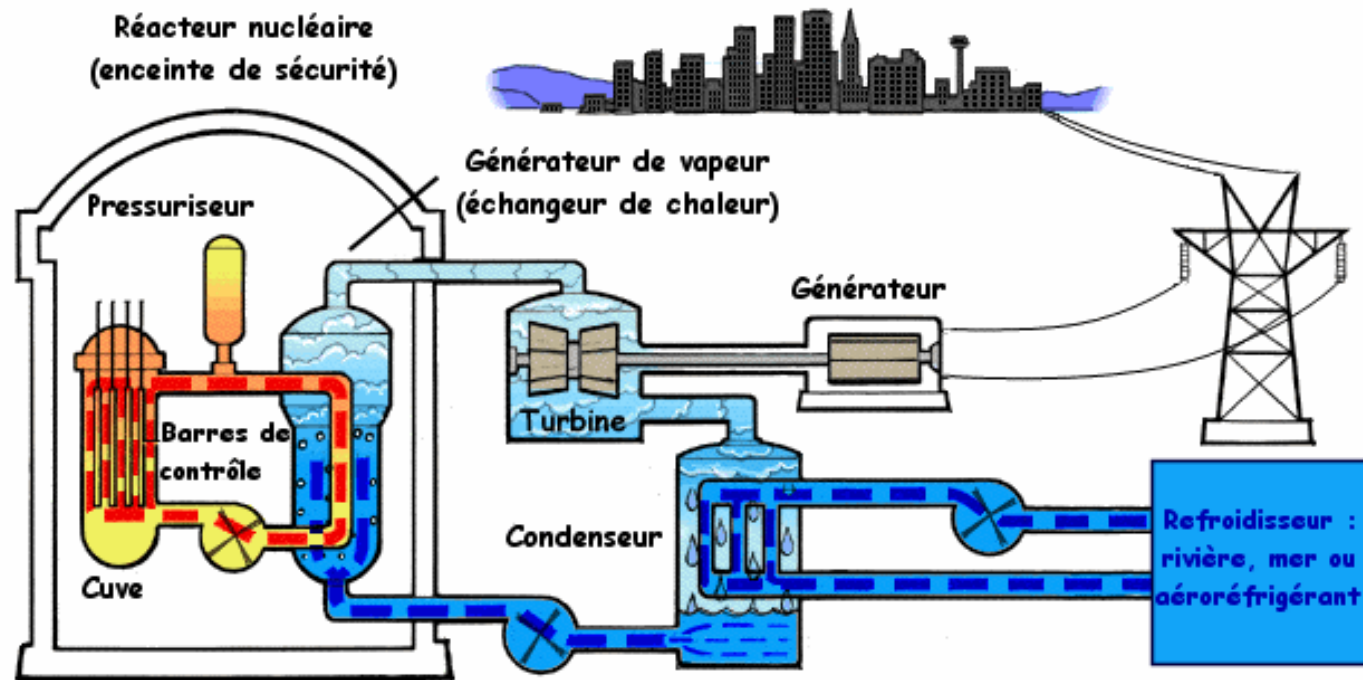
La fission nucléaire se déclenche lorsque un neutron se déplaçant à grande vitesse entre en collision avec un élément de poids atomique élevé tels que l'uranium ou le thorium , sous le choc le noyau se scinde en deux noyaux de poids atomique intermédiaire, plusieurs neutrons sont libérés et de l'énergie est dégagée, les neutrons libères font à leurs tour éclaté d'autres noyaux et libères une quantité importante de l'énergie qui est utilisé dans les centrales nucléaires ( **pour le meilleur** ) et les bombes atomiques (**pour le pire**)

## *La fission nucléaire*

Lorsqu'un neutron est capturé par un noyau  $^{235}\text{U}$ , il crée un noyau  $^{236}\text{U}$  instable, de courte durée de vie ( $\sim 10^{-14}$  s). Ce noyau subit ensuite une fission.



# *La fission nucléaire pour le meilleur*



Exemple d'application 1 :



*... et pour le pire*

## *Les réactions nucléaires*



**Projet Manhattan** est le nom de code du projet de recherche mené pendant la Seconde Guerre mondiale, qui permit aux États-Unis, assistés par le Royaume-Uni et le Canada, de réaliser la première bombe atomique de l'histoire en 1945.

## ***La bombe atomique (fission)***

- Le but d'une bombe atomique est de déclencher une réaction en chaîne. Pour cela, il faut avoir une quantité suffisante de matière fissile, c'est la masse critique. La masse critique est d'environ 52 kilogrammes pour l'uranium 235 et de 10 kilogrammes pour le plutonium 239. Une fois cette masse atteinte, la réaction en chaîne est déclenchée. Dans les bombes atomiques, la quantité de matière fissile doit même être supérieure à la masse critique, de l'ordre de trois fois en général. On parle alors de masse sur-critique.
- Pour éviter que la réaction se déclenche n'importe quand, on sépare la matière fissile en deux. De cette manière la masse critique n'est pas atteinte et il n'y a donc aucun risque qu'une fission nucléaire s'amorce sans qu'on le désire.



## Tsunami de Fukushima





***Utilisation de la radioactivité pour  
des fins thérapeutiques?***

## **La curiethérapie**

La curiethérapie a, comme son nom l'indique été inventée par Marie Curie. Elle est utilisée dans le cas de cancers, en particuliers gynécologiques, urologiques, ORL, ou bien dans le cas de tumeurs cérébrales. Les tumeurs sont ainsi détruites par les rayonnements ionisants créés par le matériel radioactif utilisé.

Les sources radioactives utilisées sont introduites lors de la curiethérapie sont :

Le Césium 137

L'Iridium 192

L'Iode 125

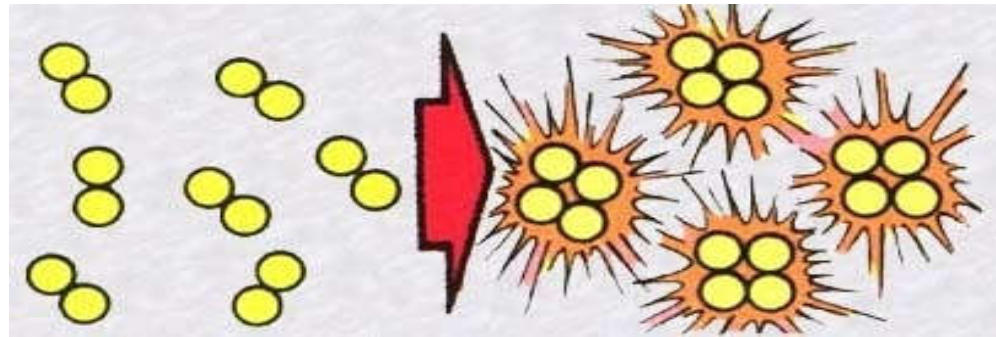
Ces trois éléments délivrent en effet des doses radioactives élevées.

Cette méthode permet d'irradier la tumeur en protégeant au maximum les organes voisins et dans certains cas d'éviter les traitements chirurgicaux.

Le traitement terminé, les sources radioactives sont retirées du patient. Pour les petites tumeurs, la curiethérapie est efficace à 80 voire 90%.

## **La radiothérapie**

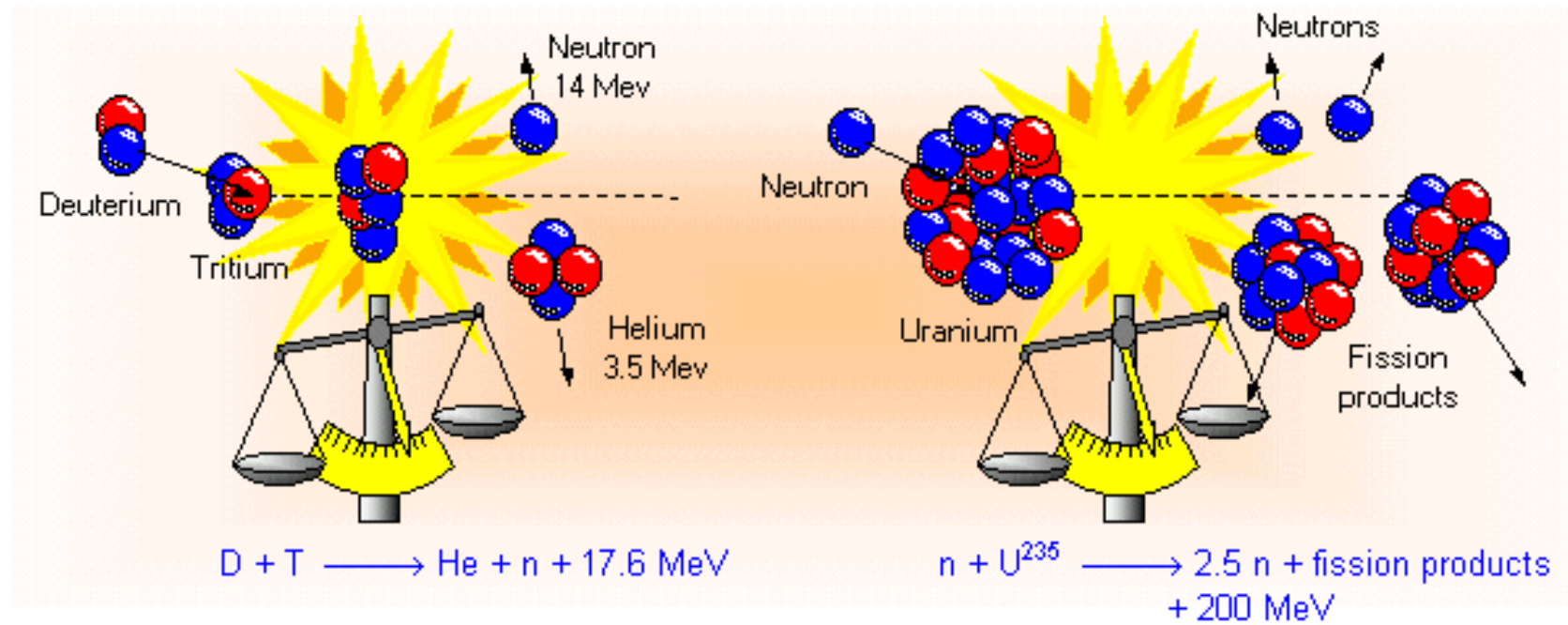
## *Fusion nucléaire*



La fusion nucléaire est une réaction où deux noyaux atomiques (comme le deutérium et le tritium) entre en collision à très haute température pour former un noyau plus lourd en dégageant un neutron, La fusion des noyaux légers dégage une énorme quantité d'énergie provenant de l'interaction forte.

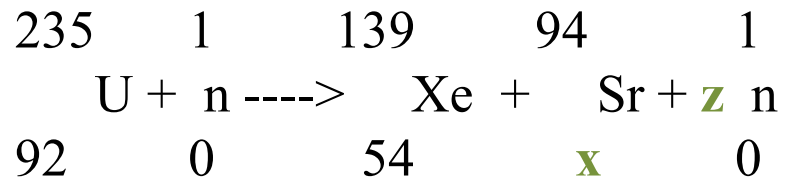
L'énergie libérée par la fusion nucléaire est la source du rayonnement des étoiles et du soleil

## *Les réactions de fission et de fusion*



### Exercice d'application 1 : *Fission de l'uranium*

Un réacteur de centrale nucléaire fonctionne à l'uranium enrichi (contenant 3% d'uranium 235 fissile et 97% d'uranium 238 non fissile). Par capture d'un neutron, le noyau  $^{235}_{92}\text{U}$  subit plusieurs types de réactions, dont l'équation est :

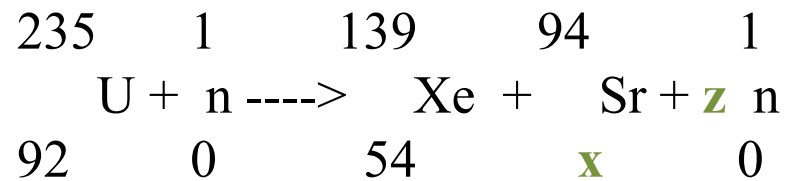


1) Compléter cette équation en calculant les valeurs de x et de z. Indiquer les lois de conservation utilisées.

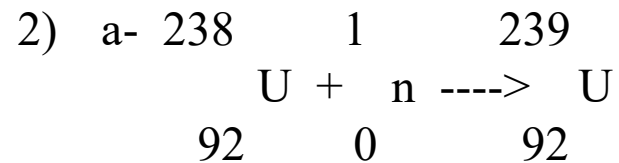
2) L'uranium 238 non fissile du réacteur se transforme pas capture d'un neutron lent en un noyau radioactif.

- a. Écrire l'équation de cette réaction nucléaire. Quel est ce noyau.
- b. Ce noyau est radioactif. A l'issue de deux désintégrations  $\beta^-$  successives, le noyau obtenu est fissile. Écrire les réactions représentant ces deux réactions nucléaires successives et identifier les noyaux formés.

## Exercice d'application 1 : *Fission de l'uranium*



- 1) conservation du nombre de charge :  $92 = 54 + x$  soit  $x = 38$   
 conservation du nombre de nucléons ( nombre de masse):  $235 + 1 = 139 + 94 + z$   
 soit  $z = 3$ .

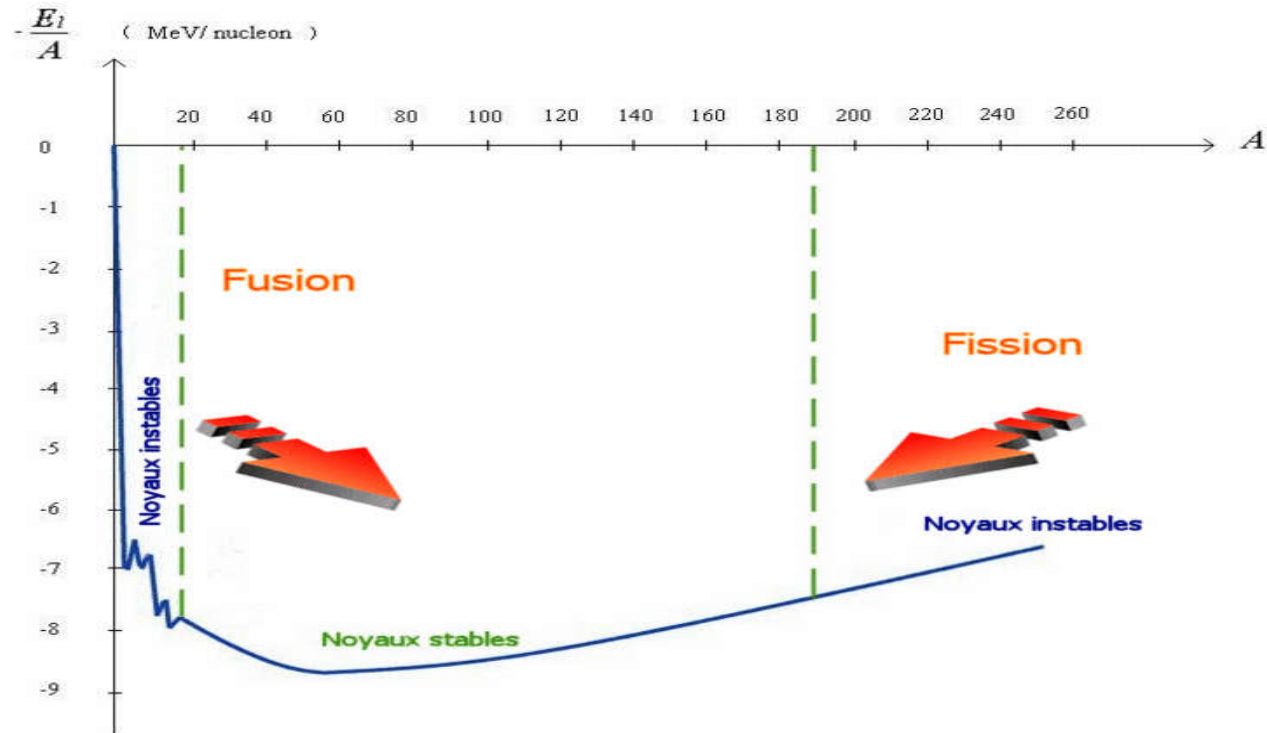


Avec les même lois  $A=239$  et  $Z=93$  Le noyau formé est donc le neptunium  
 $^{239}_{93}\text{Np}$

La seconde désintégration conduit avec les deux même lois:

Le noyau formé est du plutonium.

## Courbe d'Aston



► La figure suivante donne les valeurs moyennes de  $-E_l/A$  en fonction de  $A$  (courbe d'Aston) ; cette courbe permet de comparer la stabilité des différents types de noyaux.

► Plus l'énergie de liaison par nucléon est grande plus le noyau est stable et la désintégration est difficile.

## *Définitions et notions devant être acquises à l'issue de ce chapitre*

- Atome
- Electron
- Proton
- Neutron
- Mole
- Nucléon
- Isotope
- u.m.a
- Élément Chimique
- Molécule
- Nombre d'Avogadro
- Numéro atomique
- Nombre de Masse
- Electron-Volt (eV)
- Masse Atomique
- Défaut de masse
- Energie de cohésion
- Radioactivité
- Fission et fusion nucléaire
- courbe d'Aston



## *Historique :*

La matière est constituée d'atomes. En 1912, le physicien anglais Ernest Rutherford (qui avait montré que l'atome avait un noyau), et le physicien danois Niels Bohr mettent au point un modèle dans lequel l'atome est constitué d'un noyau de charge positive entouré d'un cortège d'électrons. En 1913, Rutherford découvre le proton et en 1932, le physicien anglais Chadwick le neutron.

En 1938, Hahn et Strassmann découvrent la fission spontanée et le physicien français Frédéric Joliot-Curie, assisté de Lew Kowarski et Hans Von Halban, montre, en 1939, que ce phénomène de cassure des noyaux d'uranium s'accompagne d'un intense dégagement de chaleur. La découverte de la réaction en chaîne permettra l'exploitation de l'énergie nucléaire.

Pendant la guerre de 1939-1945, les études sur la fission se sont poursuivies aux États-Unis, avec la participation de physiciens émigrés. Le projet Manhattan est lancé, avec pour objectif de doter ce pays d'une arme nucléaire (qui a été utilisée à Hiroshima et à Nagasaki en 1945).

Dès la fin de la guerre, les recherches sur l'énergie dégagée par la réaction de fission nucléaire sont poursuivies dans le but d'une utilisation civile.